

# Journal of Materials and Engineering Structures

## Research Paper

### Simulation numérique des déperditions de chaleur par le plancher bas des constructions via Comsol-Multiphysiques

Numerical simulation of heat losses from a slab-on-ground structure using Comsol-Multiphysics

Wisseem Bouraoui <sup>a</sup>, Nadia Laredj <sup>a</sup>, Mustapha Maliki <sup>a,\*</sup>, Hanifi Missoum <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de Construction, Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE), Université Abdelhamid Ibn Badis, 300 Rue de Belhacel, Mostaganem, Algérie

#### ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 17 Janvier 2020

Révisé : 22 Novembre 2020

Accepté : 24 Novembre 2020

Mots clés:

Transfert de chaleur

plancher-bas

Conductivité thermique

Comsol Multiphysics

Keywords :

Heat transfer

Slab-on-ground

Thermal conductivity

Comsol Multiphysics

#### RESUME

Une simulation numérique bidimensionnelle en régime transitoire en utilisant le logiciel COMSOL-Multiphysics est effectuée pour une structure expérimentale (Minnesota Experiment), en reprenant les mêmes propriétés thermo-physiques du sol et les mêmes conditions climatiques intérieures et extérieures. L'équation générale de transfert de chaleur dans les milieux poreux non saturés a été exploitée pour simuler les déperditions énergétiques. Une approche mathématique a été également mise au point pour le calcul de la conductivité thermique des matériaux afin de les rendre plus proches des valeurs réelles dans le but de comparer les résultats des températures simulées avec les valeurs mesurées in-situ. Une excellente corrélation entre les températures simulées et celles issues de la structure expérimentale a été obtenue. En parallèle, l'analyse exhaustive des flux de chaleurs traversant l'interface sol-structure nous a permis de proposer des solutions pratiques en vue de réduire les déperditions à travers le plancher bas.

#### ABSTRACT

A transient two-dimensional numerical simulation using the COMSOL-Multiphysics software, is carried out for an experimental structure (Minnesota Experiment), and using the same thermo-physical properties of the soil and the same indoor and outdoor climatic conditions. The general heat transfer equation in unsaturated porous media has been used to simulate energy losses. A mathematical approach has also been developed in order to calculate the thermal conductivity of different materials with the aim of making them closer to real values. The main goal is to compare the results of the simulated temperatures with the values measured in-situ. An excellent correlation between the simulated temperatures and those resulting from the experimental structure was obtained. At the same time, the exhaustive analysis of heat fluxes crossing the soil-structure interface has enabled us to propose practical solutions for reducing losses through the slab-on-ground.

\* Corresponding author.

E-mail address: [mustafa.maliki@univ-mosta.dz](mailto:mustafa.maliki@univ-mosta.dz)

## 1 Introduction

Le contexte énergétique mondial actuel et algérien en particulier, nous pousse à réfléchir à concevoir des solutions en matière d'économie durable en énergie, surtout si l'on sait que les réserves algériennes en énergies fossiles s'amenuiseront dans un délai de quarante ans environ. D'après les statistiques fournies par le ministère algérien de l'énergie [1], La consommation énergétique du secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire qui a progressé d'environ 25% ces dernières 25 années, constitue le premier consommateur d'énergie finale en Algérie. Ce secteur représente, à lui seul, 46% de la consommation totale d'énergie.

Dans cette optique, il est devenu primordiale d'optimiser et maîtriser les phénomènes gouvernants les fluctuations de chaleur et de masse, en ciblant particulièrement la nature des matériaux composants les parois de bâtiments. La finalité étant de concevoir des bâtiments à haute performance énergétique.

Dans ce contexte, plusieurs études ciblant la réduction des déperditions d'énergie aux différents niveaux de la structure, ont été menées. Parmi ces déperditions, celles qui s'opèrent au niveau du sol en contact direct avec les éléments de la construction ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Des chercheurs ont rapporté que la perte de chaleur au sol peut contribuer jusqu'à 50% des charges de chauffage annuelles pour un bâtiment [2,3]. En effet, cette hypothèse a été confirmée par une récente étude menée sur des maisons australiennes, visant à quantifier les déperditions thermiques au niveau de la structure en contact avec le sol, qui a affirmé que ces dernières peuvent contribuer jusqu'à 49% de la demande totale d'énergie de chauffage et de refroidissement des habitations [4].

Afin de mieux comprendre l'origine de cet important taux de déperditions et dans le but d'essayer de remédier au problème, un certain nombre de contributions a été fait dans ce domaine, spécialement, en termes de simulation numérique. Une expérience à échelle réelle a fait l'objet d'une simulation bidimensionnelle [5], où l'installation de la maison expérimentale japonaise (Japanese House) a permis la récolte de données thermiques réelles [6]. L'étude consistait principalement en la simulation des pertes de chaleur vers le sol, avec exploration de l'impact de l'isolation des bords. Aussi, Thomas et Rees [7] ont élaboré un travail similaire qui porte sur l'analyse de la réponse thermique réelle et simulée d'un bâtiment construit à cet effet, ils en concluent que la température du sol et la teneur en humidité peuvent changer de manière significative près du mur extérieur du bâtiment. Zhong et Braun [8] ont réalisé un travail de simulation numérique du comportement de la chaleur au niveau du plancher bas, d'une chambre en béton, qui est directement en contact avec le sol. Leur travail a présenté une méthode simplifiée du calcul du transfert de chaleur transitoire de la dalle qui consiste en une double simulation unidimensionnelle, la première visant à quantifier les transferts de chaleur qui s'opèrent entre l'air ambiant de la pièce et la surface intérieure du plancher alors que la deuxième concerne les flux migrant du plancher bas vers le sol. Par ailleurs, Adjali et al. [9] ont réalisé une comparaison de simulations totalement couplées (teneur en chaleur et en humidité) avec des simulations thermiques linéaires. Il a été constaté que les procédures de calcul simplifiées peuvent considérablement surestimer ou sous-estimer la valeur réelle de la perte de chaleur (jusqu'à 31% dans les exemples étudiés). Toutefois, les simulations bidimensionnelles restent souvent des méthodes trop simplifiées qui ne peuvent interpréter avec exactitude toute la complexité des transferts de chaleur qui s'opèrent entre la structure et le sol et peuvent comprendre une inexactitude significative [10, 11]. A contrario, les outils de simulation tridimensionnelle permettent un calcul plus rapide et précis de ce transfert de chaleur couplé au sol [12]; cependant, la difficulté à calculer le transfert de chaleur couplé au sol est principalement due à l'absence d'expressions mathématiques simples pour le transfert de chaleur transitoire tridimensionnel (3D) via le sol [13]. La simulation précise de la performance thermique du bâtiment continue d'être considérée comme un sujet important [14]. La simulation numérique est souvent régie par un ensemble de modèles mathématiques qui diffère selon l'approche envisagée. S.W Rees et al. [15] ont présenté dans un travail un examen approfondi des effets de transfert de chaleur du sol sur la performance thermique des structures en contact avec le sol. Ils ont décrit, dans ce même travail, les processus fondamentaux de transfert de chaleur pertinents au problème ainsi que les méthodes de détermination des propriétés thermiques des sols et ont revu de nombreuses méthodes analytiques, semi-analytiques et numériques disponibles pour résoudre le problème de transfert de chaleur. Bahnfleth [16], Deru [2] et d'autres auteurs [12,17] ont proposé un ensemble de modèles numériques, mais ils sont généralement soit numériquement simplifiés (bidimensionnels) soit d'une période spécifique étudiée. De plus, pour simplifier le processus de calcul fastidieux, beaucoup de modèles mathématiques ignorent l'influence des composants humides. Yanping et al. [18], qui avait pour principe d'ignorer l'influence des composants humides, a étudié le transfert de chaleur périodique en régime stationnaire d'une enveloppe d'ingénierie souterraine attachée. Yingying Wang et al. [19] considèrent que les approches mathématiques qui négligent le rôle du transfert de chaleur dû à

l'humidité présente dans le sol et qui simplifient les conditions aux limites comme adiabatiques et imperméables entraînent forcément des limitations dans l'application.

L'efficacité des modèles mathématiques dépend directement de la détermination précise des propriétés thermiques du sol étudié. La détermination de ces propriétés peut s'avérer compliquée pour le sol en vue de sa composition diversifiée. Il y'a de multiples méthodes de détermination des propriétés thermiques du sol [20]. Il existe dans la littérature plusieurs supports contenant des valeurs pré-calculées de ces propriétés thermiques pour certains constituants du sol [21–26]. Par ailleurs, la présence de certains matériaux dans la partie en contact direct avec la structure pourrait influencer la réponse thermique et ce en raison de certaines propriétés thermiques du matériau en question. Wenxin Li et al. [27] ont conclu de l'étude qu'ils ont menée sur une expérience de labo que l'application du matériau avec une grande diffusivité thermique comme le sable entraîne des températures plus basses de l'eau et du sol. En outre, il est nécessaire de bien connaître la couverture de la surface du sol et les propriétés du sol spécifiques au site pour obtenir des prédictions précises de la température du sol [28].

Finalement, il est généralement admis qu'il existe un nombre limité de données de terrain fiables dans le domaine de recherche se rapportant à l'analyse de la réponse thermique [7]. Parmi les données disponibles dans la littérature, nous sommes intéressés à une expérience à échelle réelle élaborée au Minnesota (Etats Unis) [29], où il s'agit d'une chambre en béton semi-enterrée au niveau de laquelle des capteurs de température ont été placés afin de requérir les données nécessaires.

Les résultats de ce travail pourraient contribuer significativement au cadre de l'évaluation des pertes de chaleur des bâtiments au sol. D'autant plus qu'il s'agit d'une analyse comparative entre les résultats réels du comportement de la température et ceux issus d'une simulation bidimensionnelle dépendante du temps, par le biais du logiciel COMSOL-Multiphysics d'une structure expérimentale (à échelle réelle) soumise à des conditions climatiques intérieures et extérieures. La simulation a été menée sur une période d'une année. Les étapes de cette simulation ont fait l'objet d'un travail antérieur disponible dans la littérature [30]. Notre but principal étant d'observer le comportement de la température à une certaine profondeur du sol et de comparer, en ce même point, les résultats de température simulés avec les valeurs de température mesurées ainsi qu'avec les résultats obtenus d'une simulation existante [15]. Aussi, une nouvelle approche mathématique a été utilisée pour le calcul de la conductivité thermique des différents types de sols, les résultats sont concordants avec les mesures in-situ.

## 2 Modèle mathématique

### 2.1 Transport d'air

Le transfert d'air à travers un milieu poreux est implicitement inclus dans l'équation de conservation de l'énergie. Le flux d'air  $g_a$  est considéré comme constant. Dans le modèle actuel, le transport d'air est considéré individuellement dans le bilan massique de l'air sec, et l'équation de conservation peut donc être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot g_a = 0 \quad (1)$$

La loi de Poiseuille [31] reliant le gradient de pression à la vitesse d'écoulement de l'air s'écrit comme suit:

$$v = -\frac{k_a}{\mu_a} \nabla p_a \quad (2)$$

Le flux d'air est ensuite calculé via la relation suivante:

$$g_a = \rho_a v \quad (3)$$

où  $k_a$  (kg / m.Pa) est la perméabilité à l'air du matériau,  $\mu_a$  (kg / m.s) est la viscosité dynamique de l'air,  $p_a$  (Pa) est la pression de l'air sec,  $\rho_a$  (kg / m<sup>3</sup>) est la densité de l'air sec.

Par conséquent, le transport d'air sec peut être écrit en remplaçant l'équation (3) dans l'équation (1). Cela conduit à l'équation suivante:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = v \cdot \nabla \rho_a \quad (4)$$

## 2.2 Transfert de chaleur

Pour les problèmes transitoires, en l'absence d'une source de chaleur dans le milieu, le flux de chaleur se compose de deux parties, à savoir la conduction et la convection, respectivement:

$$q = q_{cond} + q_{conv} \quad (5)$$

La conduction est donnée par

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (6)$$

où  $T$  (K) est la température et  $\lambda$  (W / m.K) est la conductivité thermique.

La convection de chaleur sensible et latente est donnée par:

$$q_{conv} = v \rho_a c_{P,a} \nabla T \quad (7)$$

où  $\rho_a$  (kg / m<sup>3</sup>) est la densité de l'air sec et  $c_{P,a}$  (J / kg.K) est la chaleur spécifique de l'air sec.

L'équation du bilan énergétique peut s'écrire:

$$-\nabla \cdot q = c_{P,m} \rho_m \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (8)$$

où  $c_{P,m}$  (J / kg.K) est la chaleur spécifique sèche du matériau,  $\rho_m$  (kg / m<sup>3</sup>) est la densité sèche du matériau.

Les équations (5) à (8) nous permettent de mettre l'équation générale du transfert de chaleur sous la forme suivante:

$$c_{P,m} \rho_m \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - v \rho_a c_{P,a} \nabla T \quad (9)$$

## 2.3 Conductivité thermique du sol

Les propriétés thermiques (conductivité thermique  $\lambda$  et capacité thermique volumétrique  $c_v$ ) des couches du sol en question ont été fidèlement reconstituées et introduits dans les calculs lors de la simulation numérique.

Il est convenu dans ce travail de calculer la capacité thermique des sols en additionnant les capacités thermiques des différents constituants en fonction de leurs fractions volumiques [23].

La chaleur spécifique du sol est exprimée comme suit:

$$c = x_1 \rho_1 c_1 + x_2 \rho_2 c_2 + x_3 \rho_3 c_3 \quad (10)$$

où  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  sont les chaleurs spécifiques des trois constituants du sol.  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  sont leurs fractions volumiques respectives, et  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  et  $\rho_3$  leur masses volumiques. Cette équation est dite "équation géométrique". Les fractions volumiques

d'un sol peuvent être calculées à partir de la porosité du sol  $\eta$  (volume de vides / volume total) et du degré de saturation  $S_i$  (volume d'eau / volume de vides). Elles sont obtenues à partir des relations suivantes :

$$x_1 = (1 - \eta) \quad (11)$$

$$x_2 = \eta S_i \quad (12)$$

$$x_3 = \eta(1 - S_i) \quad (13)$$

La conductivité thermique ne peut être définie par une fonction linéaire et sa détermination est généralement plus complexe et plutôt orientée vers des approches approximatives basées sur des hypothèses mathématiques théoriques. Beaucoup d'approches se rapportant à l'estimation de la conductivité thermique des sols existent dans la littérature.

De Vries [23] a proposé une autre expression pour le calcul de la conductivité thermique sous la forme suivante:

$$\lambda = \frac{\sum_i^n k_i x_i \lambda_i}{\sum_i^n k_i x_i} \quad (14)$$

où  $k_i$  est le rapport du gradient de température moyen dans les granules solides. La valeur initiale,  $k_0$  est prise égale à l'unité. Le calcul de  $k_i$  reste difficile ; une expression mathématique exacte pour  $k_i$  a été fournie pour les conditions restrictives suivantes :

- les granules ont une forme ellipsoïdale.
- les granules sont si éloignés les uns des autres qu'ils ne s'influencent pas entre eux.

Dans les deux cas,  $k_i$  peut être trouvé à partir de l'équation :

$$k_i = \sum_{a,b,c} \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right) g_a \right]^{-1} \quad (15)$$

$g_a$  est calculé à partir de l'équation :

$$g_a = \frac{1}{2} abc \int_0^\infty \frac{du}{(a^2 + u)^{3/2} + (b^2 + u)^{1/2} + (c^2 + u)^{1/2}} \quad (16)$$

où  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont les axes ou diamètres des granules ellipsoïdaux.

Cette approche a été testée sur plusieurs types de sols afin d'estimer leurs conductivités thermiques. Il a été conclu que même si l'équation (14) semble complexe et difficile à utiliser, elle fournit des résultats de conductivités thermiques calculées assez rapprochés des conductivités thermiques mesurées in-situ pour ces mêmes sols [30].

Lors de la présente simulation numérique, nous allons tester la pertinence de cette approche sur les différents types de sols du cas d'étude in-situ (expérience du Minnesota).

## 2.4 Equations de conditions aux limites

Le flux de chaleur à travers la surface extérieure donné ci-dessous comprend les effets de la conduction et de la convection.

$$q_e = \alpha_e (T^{eq} - T_{surf,e}) \quad (17)$$

où  $\alpha_e$  est le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface extérieure,  $T^{eq}$  est la température extérieure équivalente et  $T_{surf,e}$  est la température de la surface extérieure. De même, le flux de chaleur à travers la surface interne de l'enveloppe du bâtiment  $q_{n,i}$  est donné par:

$$q_i = \alpha_i (T_i - T_{surf,i}) \quad (18)$$

où  $\alpha_i$  est le coefficient de transfert de chaleur de la surface intérieure,  $T_i$  la température de l'air ambiant intérieur et  $T_{surf,i}$  la température de la surface intérieure.

### 3 Description du dispositif expérimental

L'expérience du Minnesota consiste en une chambre de forme parallélépipède en béton contenant une installation de chauffage artificielle (Figure 1 et 2) [30]. Les dimensions de la boîte sont d'environ 2,50 m de hauteur avec un plancher bas carrée de 5,89 m de côté. Le tout fermé par le haut à l'aide d'un couvercle adiabatique.

Un isolant en polystyrène extrudé à haute résistance thermique a été placé au niveau des connexions entre les murs et le couvercle adiabatique pour diminuer les pertes de chaleur au niveau des connexions. L'épaisseur des murs de béton et de la dalle de béton sont respectivement de 30,48 cm et 10,16 cm, respectivement. Il n'y a aucun acier de renfort.

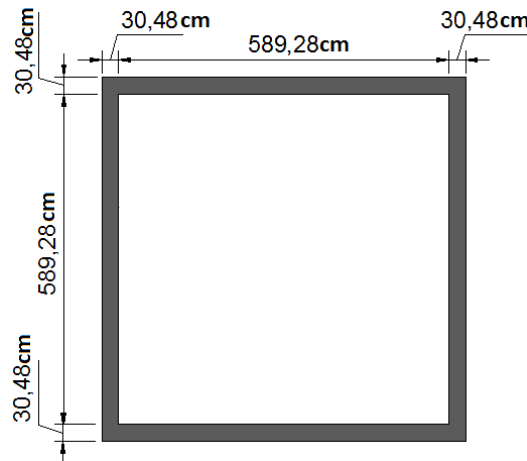


Fig.1 - Vue en plan de l'unité expérimentale.

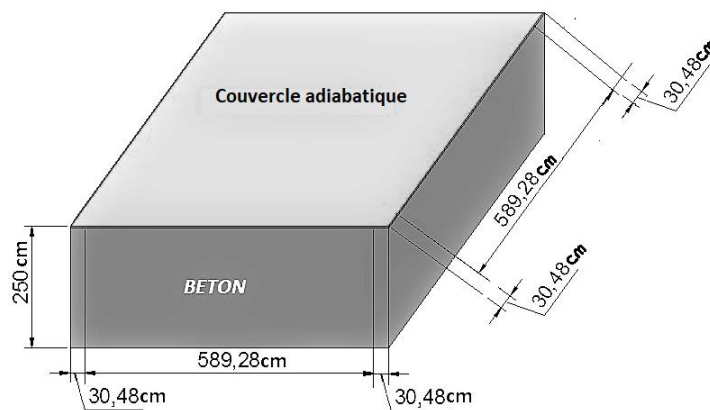
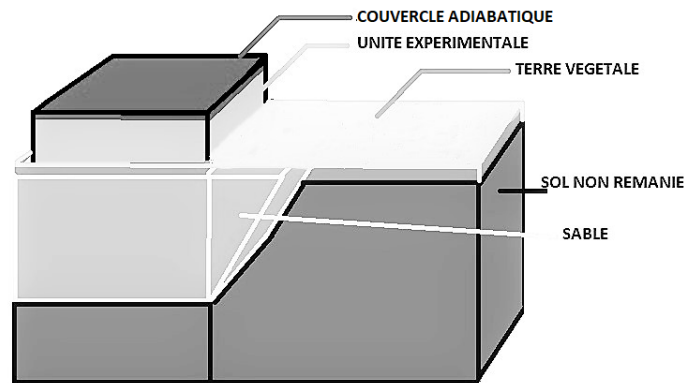


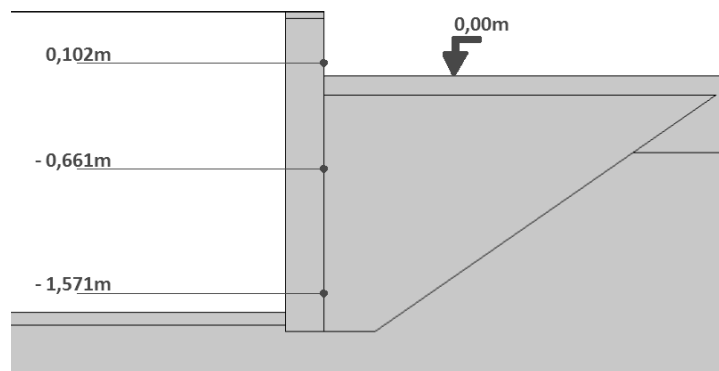
Fig.2 - Perspective 3D de l'unité expérimentale.

Cette boîte en béton est partiellement enterrée dans un sol se trouvant dans la région du Minnesota aux USA. Une excavation a été réalisée à une certaine profondeur puis remplie de sable au voisinage de la structure expérimentale. Le tout a été recouvert d'une couche de terre végétale (voir Figure3).



*Fig.3 - Vue d'ensemble de l'expérience du Minnesota.*

Deux sondes thermiques ont été fixées à différentes positions de l'interface mur-sol et une troisième à l'extérieur (voir Figure 4).



*Fig.4 - Positions des sondes thermiques.*

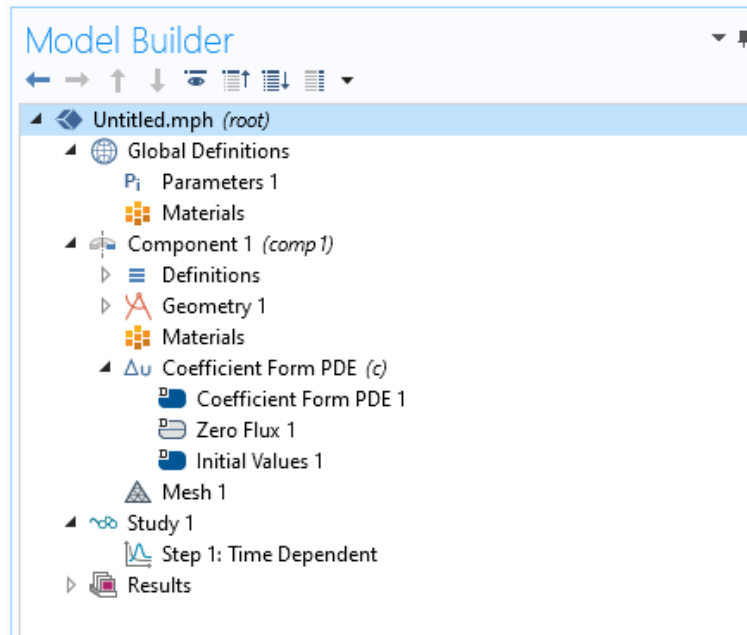
#### 4 Validation du modèle numérique

Pour mener à bien la simulation numérique, nous avons utilisé COMSOL-Multiphysics® qui est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis (Figure 5). C'est un outil qui offre un environnement interactif destiné à la modélisation et la simulation de nombreuses problématiques scientifiques et techniques. Plusieurs modules spécifiques et pré-conditionnés sont mis à la disposition des utilisateurs. Dans le présent travail, nous avons opté pour le module PDE (Equations aux Dérivées Partielles), en insérant les différents termes de l'équation générale de transfert de chaleur donnée en équation (9) et celle de la conductivité thermique à partir de l'équation (14).

La simulation sous COMSOL se déroule en plusieurs étapes distinctes. La figure 5 montre une interface du logiciel indiquant le processus à suivre pour la résolution de l'équation (17) en utilisant le module PDE, à savoir :

- 1- Choix de la dimension l'espace de travail (2D-axisymétrique)
- 2- Définitions globales (Saisie des paramètres liés notamment à la géométrie et aux matériaux).
- 3- Géométrie (Tracé de la géométrie en utilisant les différents outils de dessin disponibles).
- 4- Matériaux (Introduction des propriétés Thermo-physiques des différents matériaux utilisés)
- 5- Affectation des matériaux aux domaines géométriques correspondants.
- 6- Introduction des coefficients à dérivées partielles en fixant la T comme variable de calcul.

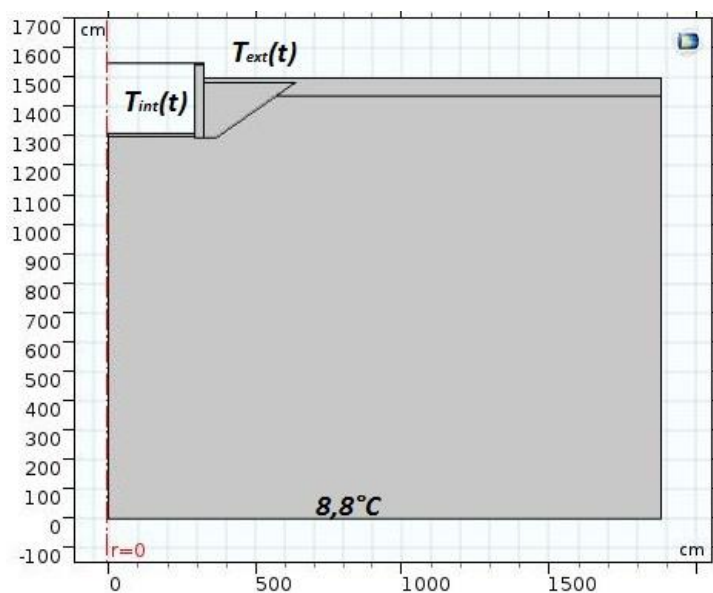
- 6-1- Introduction des conditions aux limites de température (affectés à chaque frontière).
- 6-2- Introduction des conditions initiales de température (affectés à chaque domaine).
- 7- Maillage de la géométrie.
- 8- Détermination de l'intervalle temps et du pas de calcul.
- 9- Exploitation des résultats (graphique, image, tableur ou vidéo ...)



*Fig. 5 - Interface de travail sous COMSOL et organigramme de la simulation*

#### 4.1 Géométrie

La géométrie de la structure expérimentale en béton ancrée dans le sol est représentée en figure 6. En considérant les différents domaines la constituant. La structure étant parfaitement symétrique, l'étude ne considère que la moitié de la structure initiale. Ceci a pour avantage de réduire le temps de calcul lors de la simulation.



*Fig.6 - Coupe de la structure/ COMSOL.*



#### 4.2 Propriétés thermo-physiques

Ces propriétés ont été calculées par les approches théoriques disponibles dans la littérature. La conductivité thermique des couches de sol ont été calculés en se référant à l'approche de De Vries [23], détaillée plus haut.

Un matériau est affecté à chaque domaine de la géométrie avec ses propriétés thermiques spécifiques, nécessaires à la simulation. Les travaux de Shipp [29] sur le site expérimental du Minnesota ont fourni une bonne indication sur la probable variation des propriétés thermo-physiques des matériaux. Ces mêmes valeurs ont été utilisées dans la présente simulation [Tableau 01].

**Tableau 1- Propriétés thermiques des différentes couches du sol**

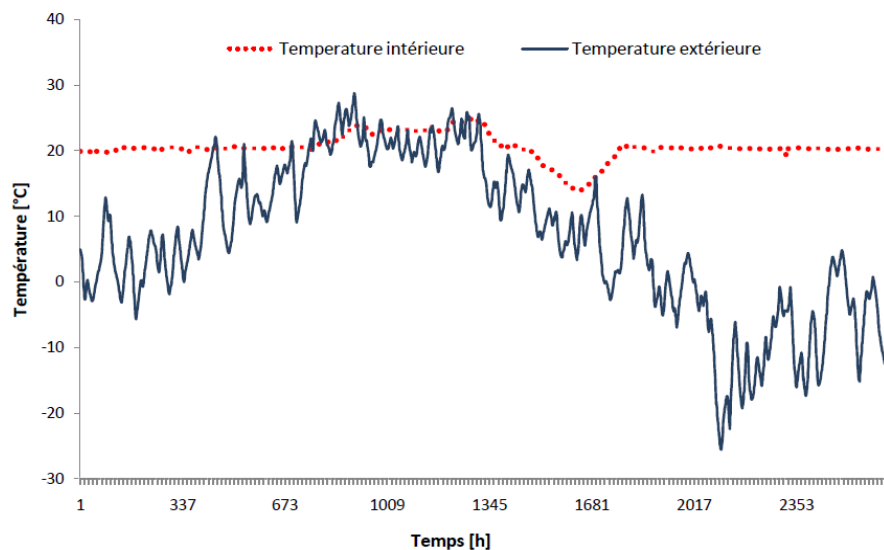
| Matériaux       | Masse volumique<br>$\rho[kg/m^3]$ | Conductivité thermique<br>$\lambda[W/mK]$ | Chaleur spécifique volumétrique<br>$C_p[J/kg \times K]$ |
|-----------------|-----------------------------------|---|---|
| Béton           | 2300                              | 1,820                                     | $6,391 \times 10^2$                                     |
| Terre agricole  | 2700                              | 0,942                                     | $9,000 \times 10^2$                                     |
| Sable           | 2650                              | 1,178                                     | $7,207 \times 10^2$                                     |
| Sol non-remanié | 2720                              | 1,146                                     | $6,875 \times 10^2$                                     |

#### 4.3 Conditions aux limites et initiales

Les conditions aux limites extérieures ont été obtenues à partir des données climatiques de la région du Minnesota mesurées sur une période d'une année (Figure 7). L'intérieur de la chambre est maintenu à une température autour de 20°C.

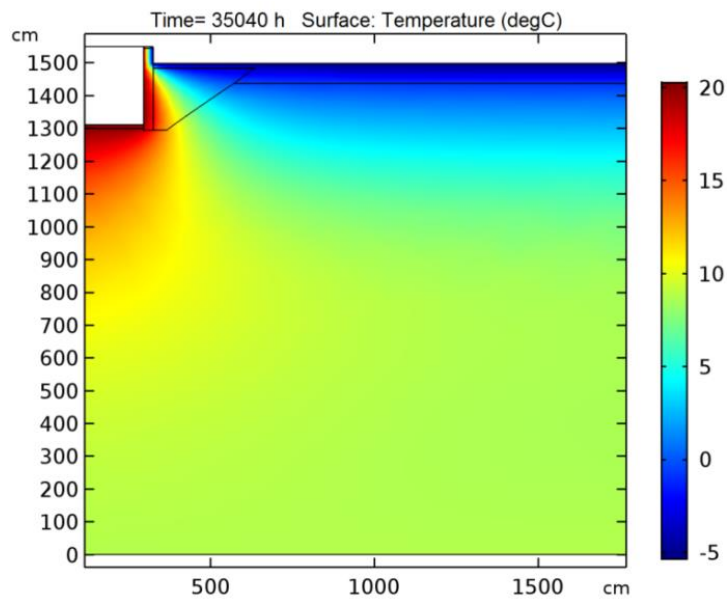
Une analyse préliminaire des données a indiqué qu'au delà de 10m en dessous du niveau naturel, la température du sol reste constante autour de 8,8°C. Cette valeur a donc été appliquée en tant que condition au limite fixe pour la surface inférieure du domaine.

Les conditions initiales de simulation pour l'ensemble de la géométrie a été fixée à 20°C.



**Fig.7 - Conditions aux limites de température extérieure et intérieure [C°].**

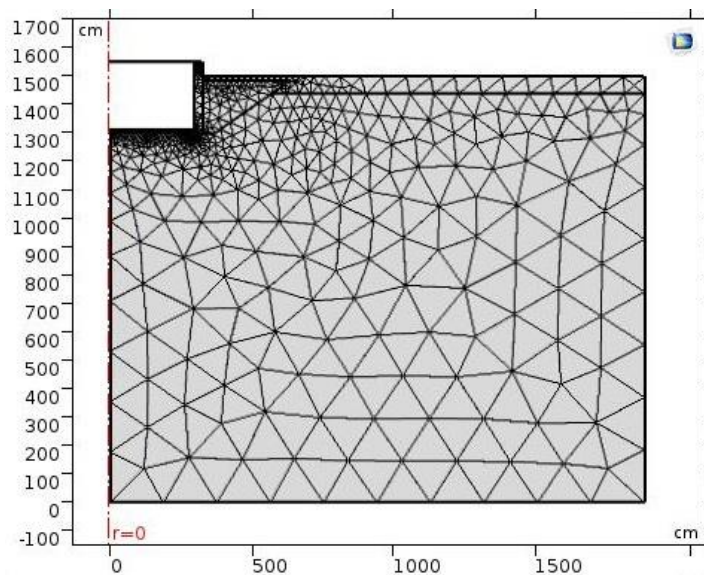
Afin de stabiliser les valeurs de la température simulée et se rapprocher le plus possible des températures initiales de la structure réelle, le programme a été exécuté sur une période de quatre années consécutives (0 à 35040 heure) (Figure 8). La simulation effective ne démarre donc qu'à partir de la fin de la quatrième année et s'achève à la fin de la cinquième (35040 à 43800 heures)



*Fig.8 - Conditions initiales de l'ensemble sol-structure [ $^{\circ}\text{C}$ ].*

#### 4.4 Maillage

Le maillage employé est un maillage triangulaire qui consiste en 3787 éléments avec une qualité moyenne de l'ordre de 0.8166 (Figure 9). Le maillage a été affiné au niveau des interfaces sol-structure afin que les résultats obtenus soient le plus précis possible. Le temps de résolution sur un PC quadri-cœur CPU 2,40 GHz est d'environ 20 minutes, ce qui est acceptable.



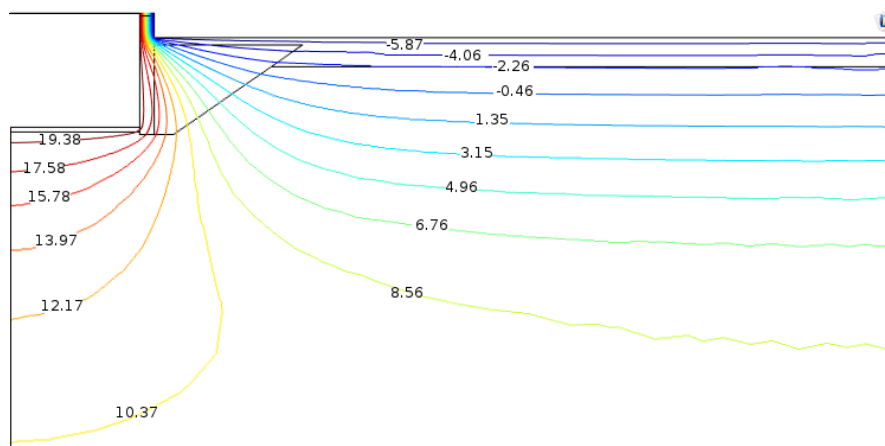
*Fig.9 - Maillage de l'ensemble sol-structure.*

## 5 Résultats et discussions

### 5.1 Température

La figure 10 montre les contours de température (lignes isothermes) obtenus à la fin de la période analysée. Il est à noter que les résultats sont très similaires aux conditions initiales utilisées. Ce qui confirme la validité des hypothèses utilisées. Les températures les plus froides sont observées au niveau de la surface du sol ainsi qu'au côté extérieur du mur ce qui est logique puisque ces deux derniers sont en contact avec l'atmosphère et que la fin de la simulation est dans la période hivernale. La

température en profondeur ne descend pas sous la valeur de  $10,37^{\circ}\text{C}$  ce qui laisse entendre qu'à la fin de la simulation (période hivernale) le sol profond reste plus chaud qu'en surface. Les températures les plus élevées (entre  $17,58^{\circ}\text{C}$  et  $19,38^{\circ}\text{C}$ ) se trouvent à proximité de la structure et sont justifiées par la présence d'une température constante d'environ  $20^{\circ}\text{C}$  à l'intérieur de la chambre.

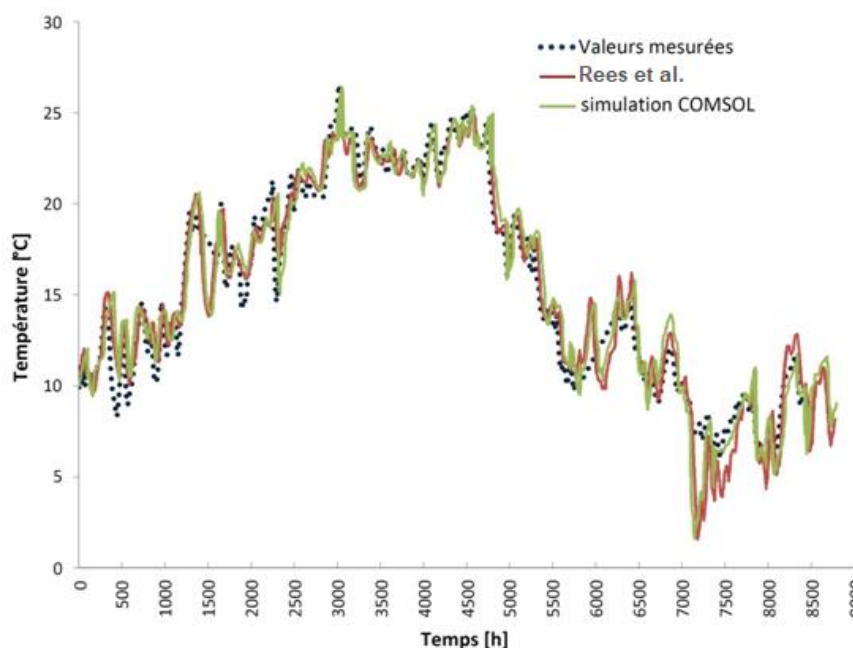


**Fig.10 - Isothermes de température à 365 jours (fin de la simulation) [ $^{\circ}\text{C}$ ].**

Les figures 11, 12 et 13 illustrent les résultats simulés, comparés avec les valeurs des températures mesurées et celles des températures obtenues à partir des résultats de simulation de Rees et al. [30].

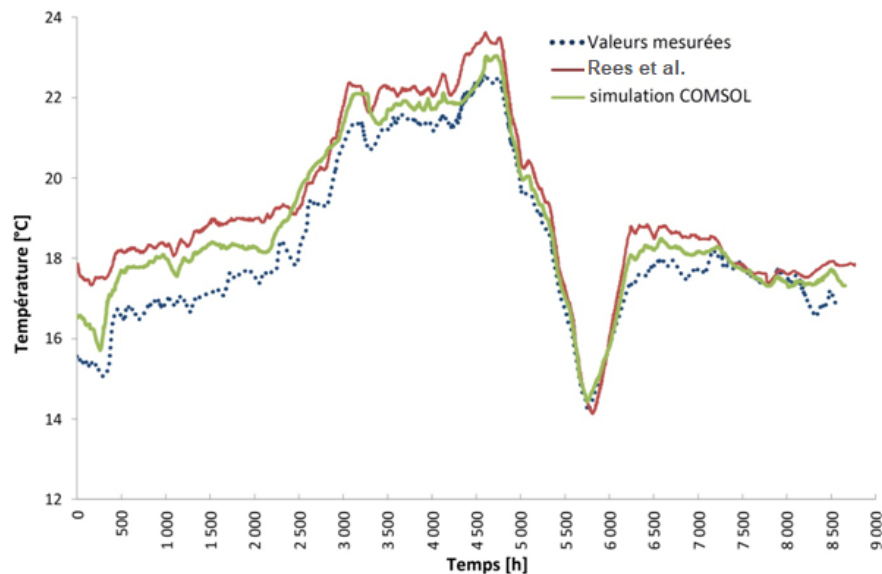
La figure 11, représente la variation de température à 1.02m au-dessus de la surface du sol. Les allures des trois courbes sont globalement concordantes et présentent une évolution similaire. Cependant, il est à noter qu'il y a une certaine disparité durant la partie la plus froide de l'année et que la corrélation entre les résultats est optimale au niveau des températures les plus élevées.

De plus, une inspection plus minutieuse des trois courbes dévoile que les résultats simulés au moyen du logiciel COMSOL enregistrent un écart moyen égal à 9.596% pour l'ensemble des points correspondants aux valeurs mesurées, qui reste moins important que celui enregistré entre ces dernières et les résultats obtenus de la simulation antérieure de Rees et al. [30].



**Fig.5 - Profils des températures sur une période d'une année à 0,102m au-dessus du niveau naturel [ $^{\circ}\text{C}$ ].**

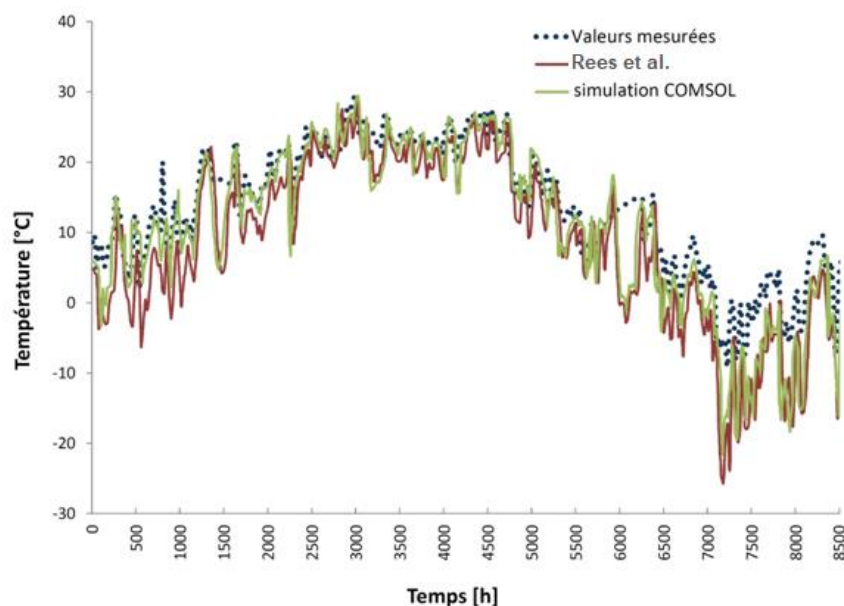
La figure 12, représente les variations de la température enregistrées à 0.661 m sous la surface du sol. A cet emplacement du capteur, nous pouvons présumer qu'il y a eu transfert de chaleur direct entre la structure et le sol. De même que pour la position du capteur de température précédente, nous notons, là aussi, que les aspects des trois courbes sont globalement semblables. Par ailleurs, les températures résultantes de la simulation à l'aide du logiciel COMSOL se rapprochent plus des valeurs de température mesurées avec un écart moyen de 4.915% inférieur à celui qui est observé entre la courbe des températures simulées par Rees et al. [30] et celle des valeurs mesurées in-situ.



**Fig.6 - Profils des températures sur une période d'une année à 0,661m au-dessous du niveau naturel [°C].**

La figure 13 illustre les résultats obtenus à une distance de 1.571m sous la surface du sol. A la différence des deux figures précédentes, une certaine altérité est observée entre les valeurs de température mesurées et les deux courbes de valeurs simulées, ce même au début et malgré la tentative de reproduire une température initiale réaliste.

Dans l'ensemble, l'allure des trois courbes concorde au-delà du fait que les valeurs issues de la simulation via le logiciel COMSOL convergent vers les valeurs mesurées d'une manière plus marquée que les résultats de Rees et al. [30]. Les résultats simulés via COMSOL et ceux mesurés enregistrent un écart moyen de 1.767%.

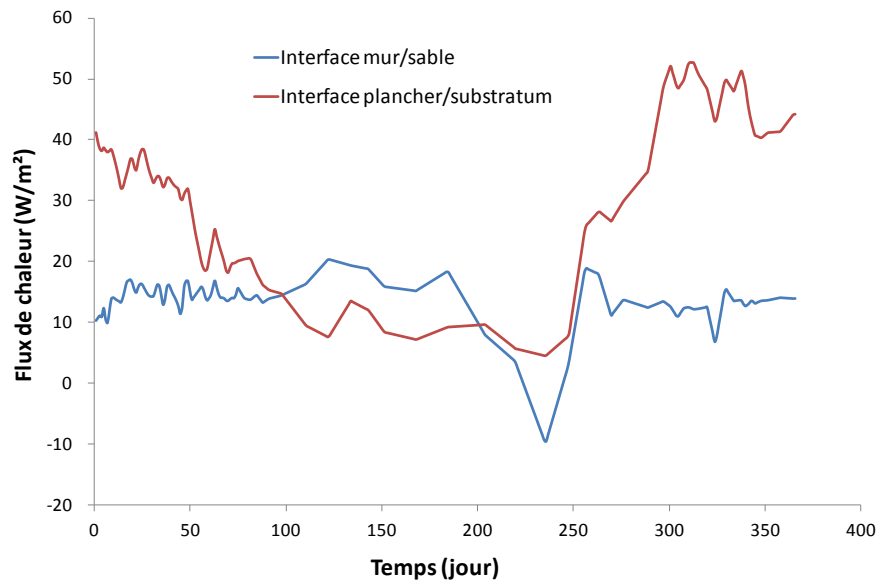


**Fig.7 - Profils des températures sur une période d'une année à 1,571m en-dessous du niveau naturel.**

## 5.2 Flux de chaleur

La figure 14 représente les fluctuations en fonction du temps du flux de chaleur qui traverse l'excavation remplie de sable en contact direct avec le mur, comparé au flux à l'interface du plancher et du sol non remanié. Les équations des conditions aux limites (16) et (17) ont été mises à contribution pour le calcul des flux entrants et sortants.

Il est à noter que les pertes de chaleurs au niveau du mur sont nettement moins considérables que celles qui s'opèrent au niveau du plancher bas. On enregistre un écart moyen de 6.9% entre les deux courbes en faveur de l'interface plancher-substratum.



**Fig.8 - Profils des flux de chaleurs à travers les interfaces sol-structure.**

On observe que le flux qui émane de la dalle est supérieur à celui qui traverse le mur durant toute l'année considérée, à l'exception de la période entre le jour 100 et le jour 200 c'est-à-dire entre la date du 08 Juin 1990 et celle du 16 Septembre 1990 qui est la période chaude de l'année.

Cette tendance nous a permis à juste titre de conclure que la présence de sable aux alentours de la structure enterrée permettrait de limiter les déperditions d'énergie, contrairement à si l'on remet le sol initialement excavé lors de la fouille.

Ceci peut s'expliquer par deux facteurs essentiels :

- La nature même du sable qui est caractérisé par une forte porosité comparé au sol non remanié, la présence d'air dans le sable permet de limiter d'avantage les déperditions comparées à un autre sol plus dense et plus compact.
- La faible valeur de la conductivité thermique de la terre végétale 0.942 qui recouvre le sable contre 1,146 pour le sol non remanié.

Il n'est pas à exclure que la particularité du comportement du flux est due au fait qu'à cette période précise, les variations de températures, intérieures et extérieures, ont montré des allures très similaires, et leurs valeurs étaient très rapprochées avec une différence moyenne de 0,96°C comparée aux deux autres périodes hivernales dans lesquelles des différences de températures  $T_{int}$  et  $T_{ext}$  sont respectivement : 3,99°C et 6,37°C.

## 6 Conclusion

Ce travail nous a permis, dans un premier lieu, d'analyser la répartition de la température dans les différentes couches du sol de fondation. La corrélation globale des résultats obtenus nous affirme que les hypothèses posées et la réflexion mathématiques employée pour la détermination des propriétés thermiques sont plausibles. De plus, le rapprochement des profils de température, obtenus via le logiciel COMSOL, de ceux mesurés laisse à croire que l'utilisation de ce logiciel serait

plus judicieuse dans ces tentatives d'estimation. D'un autre côté, la détermination des flux de chaleur a été explorée dans ce travail. Une analyse plus approfondie de l'allure de ces derniers laisse à entendre que la présence du sable en contact direct avec la structure pourrait amortir, d'une manière considérable, l'importance des flux sortant et par ce fait diminuer le taux de déperditions de chaleurs au niveau de la partie enterrée de la structure.

En général, les résultats de températures et de flux de chaleur présentés ont des profils assez cohérent, néanmoins, des travaux complémentaires sont nécessaires pour l'accomplissement d'une approche plus réaliste qui comprend la considération des flux de convection ainsi que l'importance de la teneur en eau des différentes couches du sol.

## RÉFÉRENCES

- [1]- APRUE, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie, Algérie.
- [2]- M. Deru, A model for ground-coupled heat and moisture transfer from buildings. NREL/TP-550-33954, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, 2003.
- [3]- R. Neymark, I. Judkoff, A. Beausoleil-Morrison, M. BenNakhi, M. Crowley, R. Deru, H. Henninger, J. Ribberink, A. Thornton, M. Wijsman, M. Witte. International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST) In-Depth Diagnostic Cases for Ground Coupled Heat Transfer Related to Slab-on-Grade Construction. NREL/TP-550-43388. Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [4]- C. Dong, Heat Loss via Concrete Slab Floors in Australian Houses. *Procedia Eng.* 205 (2017) 108-115. doi:10.1016/j.proeng.2017.09.941
- [5]- Z. Zhou, S.W. Rees, H.R. Thomas, A numerical and experimental investigation of ground heat transfer including edge insulation effects. *Build. Environ.* 37(1) (2002) 67–78. doi:10.1016/S0360-1323(00)00089-5
- [6]- P. Sobotka, H. Yoshino, S. Matsumoto, The analysis of deep basement heat loss by measurements and calculations. *ASHRAE Trans.* 101(2) (1995) 3896-3908.
- [7]- H.R. Thomas, S.W. Rees, The thermal performance of ground floor slabs—a full scale in-situ experiment. *Build. Environ.* 34(2) (1998) 139-164. doi:10.1016/S0360-1323(98)00001-8
- [8]- Z. Zhong, J.E. Braun, A simple method for estimating transient heat transfer in slab-on-ground floors. *Build. Environ.* 42(3) (2007) 1071-1080. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.030
- [9]- M.H. Adjali, M. Davies, S.W. Rees, A comparative study of design guide calculations and measured heat loss through the ground. *Build. Environ.* 39(11) (2004) 1301-1311. doi:10.1016/j.buildenv.2004.03.006
- [10]- S.W. Rees, H.R. Thomas, Z. Zhou, Ground heat transfer: some further insights on the influence of three dimensional effects. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 21(4) (2000) 233–239. doi:10.1177/014362440002100404
- [11]- M.H. Adjali, M. Davies, S.W. Rees, J. Littler, Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three-dimensional numerical simulations and comparison with experimental data. *Build. Environ.* 35(7) (2000) 655–62. doi:10.1016/S0360-1323(99)00050-5
- [12]- J.F. Nathanael Kruis, Development and Application of a Numerical Framework for Improving Building Foundation Heat Transfer Calculations, PhD Thesis, Colorado University-USA, 2015.
- [13]- C. Dong, Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions. *Energy Build.* 60 (2013) 420-428. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.030
- [14]- A. Friedman, V. Cammalleri, Reducing energy resources and construction waste through effective residential unit design. *Build. Res. Inf.* 22(2) (1994) 103-108. doi:10.1080/09613219408727358
- [15]- S.W. Rees, M.H. Adjali, Z. Zhou, M. Davies, H.R. Thomas, Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 4(3) (2000) 213-265. doi:10.1016/S1364-0321(99)00018-0
- [16]- W. Bahnfleth, C. Pedersen, A Three-Dimensional Numerical Study of Slab-on-Grade Heat Transfer. *ASHRAE Trans.* 96 (1990) 61–72.
- [17]- H. Janssen, J. Carmeliet, H. Hens, The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, *Build. Environ.* 39 (2004) 825–836. doi:10.1016/j.buildenv.2004.01.004
- [18]- Y. Yanping, J. Honghu, D. Yanxia, C. Baoyi, Semi-analytical solution for steady-periodic heat transfer of attached underground engineering envelope. *Build. Environ.* 43(6) (2008) 1147-1152. doi:10.1016/j.buildenv.2007.03.001
- [19]- W. Yingying, J. Chao, L. Yanfeng, W. Dengjia, L. Jiaping, The effect of heat and moisture coupling migration of ground structure without damp-proof course on the indoor floor surface temperature and humidity: Experimental study. *Energ. Build.* 158 (2018) 580-594. doi:10.1016/j.enbuild.2017.10.064
- [20]- O. Farouki, Evaluation of methods for calculating soil thermal conductivity. CRREL Report 82-8 (US Army Cold

- Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire 03755), 91 (1982).
- [21]- S.P. Clark, Handbook of physical constants. Geological Society of America (97) (1966) 78-96.
- [22]- B.K. Hough, In: Basic soils engineering, New York: Ronald Press, 1969.
- [23]- D.A. De Vries, The thermal conductivity of soil. Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen 52(1) (1952) 1-73. doi:10.1038/1781074a0
- [24]- United Nations Centre for Human Settlements. Construction Primer, Habitat 8, 1984.
- [25]- Technical Memorandum No. 12. Small scale manufacture of stabilised soil blocks. International Labour Office, Geneva, 1987.
- [26]- D.J.T. Webb, Stabilised soil building blocks, PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK 1988.
- [27]- L. Wenxin, L. Xiangdong, P. Yuanlingg, W. Yongg, T. Jiyuan, Experimental and numerical investigations on heat transfer in stratified subsurface materials. Appl. Therm. Eng. 135 (2018) 228-237. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.02.037
- [28]- M. Chalhoub, M. Bernier, Y. Coquet, M. Philippe, A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. Renew. Energy 103 (2017) 295-307. doi:10.1016/j.renene.2016.11.027
- [29]- P.H. Shipp, Basement, crawlspace, and slab-on-grade thermal performance. In: Proceedings of the ASHRAE/DOE Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, Las Vegas, NV (6–9 December 1982) 1983, pp. 160–79.
- [30]- S.W. Rees, Z. Zhou, H.R. Thomas, Ground heat transfer: A numerical simulation of a full-scale experiment. Build. Environ. 42(3)(2007) 1478-1488. doi:10.1016/j.buildenv.2005.12.022
- [31]- H.-J. Steeman, M. Van Belleghem, A. Janssens, M. De Paepe, Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage. Build. Environ. 44(10) (2009) 2176-84. doi:10.1016/j.buildenv.2009.03.016